

Recherche d'un prévisionneur pour la prévision des crues de la Seille à Metz en l'absence de stations amont efficaces

Jean-Claude MAILHOL (1)

RÉSUMÉ

Cette étude est une contribution à l'amélioration de la prévision des crues dans le cas particulier où l'on ne peut utiliser les stations amont, d'une part, pour des raisons liées à la singularité de la genèse des crues dans le bassin et, d'autre part, parce qu'elles ne sont pas disponibles aux pas de temps compatibles avec les exigences de la prévision.

On montre qu'il est néanmoins possible de résoudre ce problème pour le délai de prévision 6 heures, en utilisant un bassin voisin de taille bien plus réduite situé à l'Ouest et au-devant des perturbations océaniques. La différence de taille, d'une part, et le comportement hydrologique (contexte géologique différent) particulier à ce bassin (réactions du type impulsion), d'autre part, nous amènent à traiter le signal de ce prévisionneur afin d'accroître l'efficacité de sa contribution à la prévision.

On analyse également le gain que peut apporter une telle transformation selon que l'on utilise, ou non, une méthode adaptative (ici un filtre de Kalman) pour réaliser la prévision.

MOTS-CLÉS : Seille à Metz – Prévision des crues – Filtre de Kalman – Modèle de prévision – Prévisionneur.

ABSTRACT

A PREDICTOR FOR FLOOD FORECASTING OF THE SEILLE AT METZ IN THE ABSENCE OF EFFECTIVE UPSTREAM STATIONS.

This study contributes to the improvement of flood forecasting when it is not possible to use the stations upstream for reasons related to the peculiarity of the flood production in the basin and also because their time steps are not compatible with the forecasting requirements.

Nevertheless, this problem can be solved for a 6 hour forecasting period by using a neighbouring basin of a smaller size situated to the West and receiving oceanic rainfalls. The difference in size, on the one hand, and the hydrological behaviour (different geological situation) peculiar to this basin (reactions of the pulse type) on the other hand lead us to transform the information given by this predictor in order to improve its contribution to the flood forecasting.

The improvement likely to be brought by such a transformation is also analysed according to whether or not an adaptive method (namely a Kalman filter) is used for the forecasting.

KEY WORDS : Seille at Metz – Flood forecasting – Kalman's filter – Forecasting model – Predictor.

1. INTRODUCTION

La Seille, affluent rive droite de la Moselle à Metz, draine un bassin de 1 286 km².

La particularité de la genèse des crues dans ce bassin (fig. 1) rend inutilisables les données des stations amont (Nomeny, Château-Salins, Vic/Seille) pour la prévision des débits à Metz. Les raisons à cela sont liées à la forme particulièrement allongée du bassin, mais surtout à une forte contribution (importante densité de drainage) du bassin intermédiaire entre Nomeny et Metz.

(1) CEMAGREF. BP 5095, 34033 Montpellier Cedex.

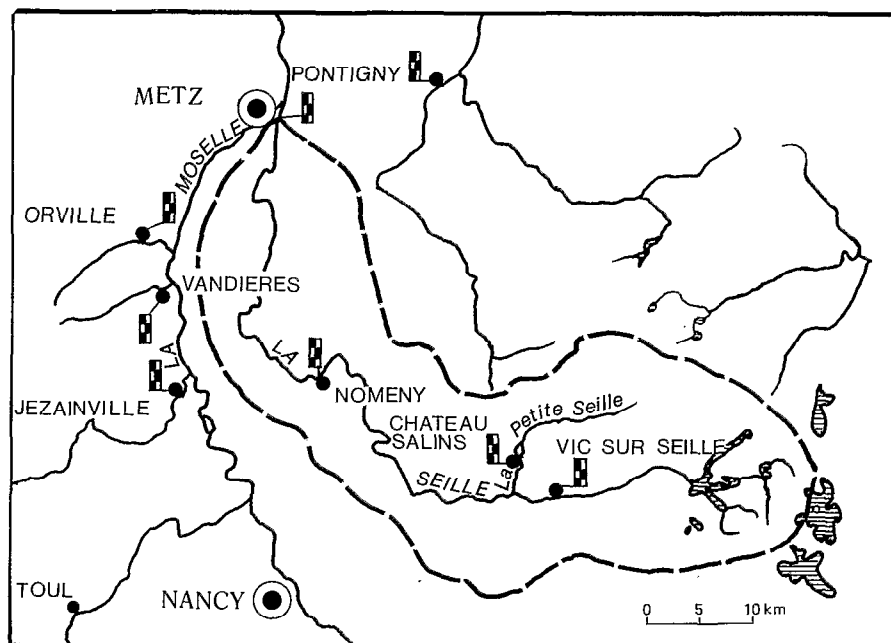


FIG.1. - Bassin de la Seille à Metz

C'est ce bassin intermédiaire qui semble être responsable des crues les plus fortes (et pointues) et qui se superposent à la contribution bien plus lente de la partie amont du bassin. Les exemples de crues présentés aux figures 2 à 4 confirment cela de façon nette. On remarque en effet que les pointes de crues de la Seille à Nomeny sont au mieux concomitantes avec celles de la Seille à Metz ; elles peuvent accuser même un léger retard (crue de décembre 1981). Quant à celles de Château-Salins, elles sont systématiquement en retard par rapport à celles de Metz.

Il apparaît alors clairement que, hormis les recours aux méthodes de prévision faisant appel aux pluies (non disponibles pour l'instant au pas de temps inférieur à 24 heures), il n'est pas possible de prévoir les débits de la Seille à Metz avec pour prévisseur les débits de stations amont. Néanmoins, la région environnante étant relativement dense en stations hydrométriques, il a été possible, après plusieurs essais, de retenir la station du Trey à Vandières.

Il a cependant paru nécessaire de traiter la réponse de ce bassin, afin de rendre sa contribution encore plus significative qu'elle ne l'était en prenant le signal brut dans le modèle de prévision.

2. RECHERCHE D'UN MODÈLE DE PRÉVISION A 6 HEURES

Le bassin du Ru du Vicherey, situé dans le bassin intermédiaire (entre Nomeny et Metz), eut été certes très efficace pour notre prévision ; il avait l'avantage d'appartenir au même contexte (variabilité spatiale possible de la pluie) et en quelque sorte, de par sa taille même, de pouvoir se substituer au prévisseur « pluies efficaces », difficile à estimer. Il est fort regrettable que ce bassin ne soit plus contrôlé depuis 1977.

Parmi les bassins voisins disponibles, seul le Trey à Vandières (38 km²) a des crues en avance sur celles de la Seille à Metz, comme en témoignent les figures 2 et 4.

Nous allons analyser, dans ce qui suit, la manière avec laquelle nous allons devoir prendre en compte dans le modèle de prévision le prévisseur « débit » de ce bassin.

Nous avons convenu de travailler au pas de temps (pdt) de 2 heures ; les débits seront donc des débits moyens sur deux heures et l'intervalle sera de 2 heures. Lors de l'application en temps réel, il s'agira bien sûr de valeurs instantanées (hauteurs) télétransmises toutes les 2 heures.

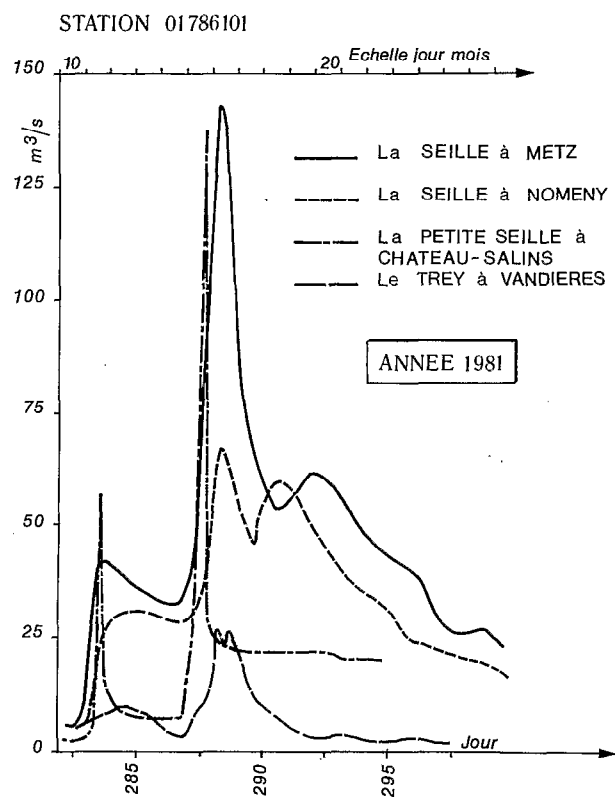


FIG.2

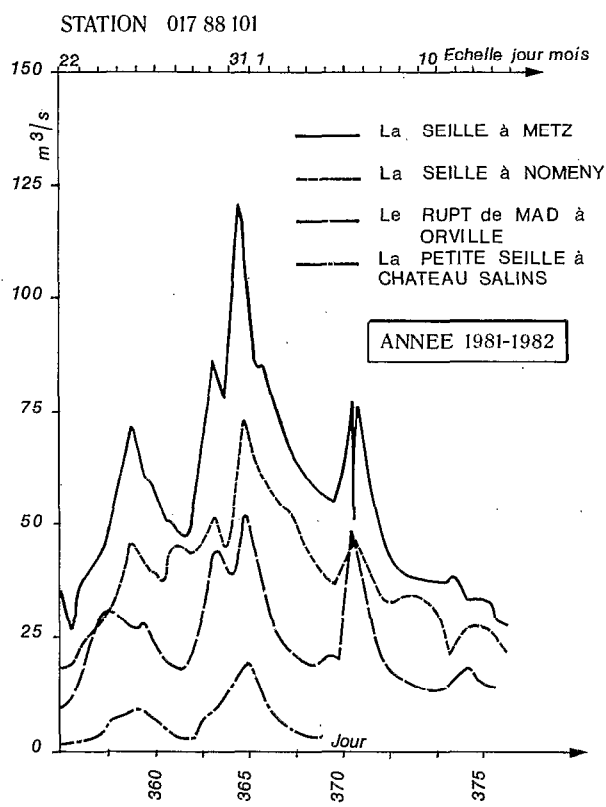


FIG.3

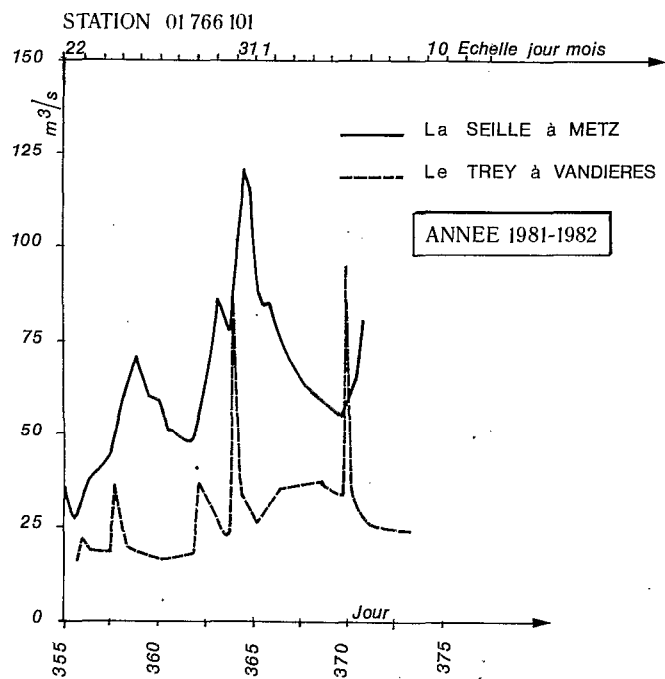


FIG.4

FIG.2. - Crue d'octobre 1981

FIG.3. - Crue de décembre 1981

FIG.4. - Hydrogrammes de la Seille et du Trey

Notations :

QM (+ 3) : débit de la Seille à Metz à 6 heures (à 3 pdt)

QM (0) : débit de la Seille à Metz au moment $t = 0$ de la prévisionQV (L) : débit du Trey à Vandières, L pas de temps précédant $t = 0$

L'échantillon de calage est relatif à la crue du 16 octobre 1981 (QIX # 145 m³/s). La crue de décembre 1981 nous permettra de vérifier la validité du modèle retenu. Ces deux crues sont les seules importantes à notre disposition, la station de Vandières n'étant en fonction que depuis 1980 et la station de la Seille à Metz n'ayant pas fonctionné lors des crues importantes d'avril et mai 1983. Précisons cependant qu'en toute rigueur, pour caler correctement le filtre des moindres carrés, il importe que les erreurs soient indépendantes, ce qui nous contraint à une sélection des observations indépendantes, ou tout au moins suffisamment décalées dans le temps ; lors de l'application du modèle linéaire en temps réel, il va de soi que la liaison entre erreurs successives existe. Elle sera d'ailleurs mise à profit pour corriger une prévision (par filtrage optimal).

Pour améliorer la contribution du Trey à Vandières, il apparaît (cf. fig. 2) qu'une simple multiplication des débits par un facteur k (k = rapport des superficies des 2 bassins à la puissance 0,8) peut ne pas suffire à cause du caractère trop impulsif, comparé à la Seille, que présente ce prévisseur. En effet, bien que le résultat d'un calage par les moindres carrés soit jugé satisfaisant, ce caractère impulsif fait davantage problème en mode adaptatif, la sous-estimation logique en début de crue étant rapidement compensée par une surestimation au niveau de la pointe (cf. fig. 5). Pour tenter de supprimer cet inconvénient, d'autres transformations ont été analysées. Le but de la transformation est illustré à la fig. 6. La première de ces transformations est représentée dans le modèle ci-après.

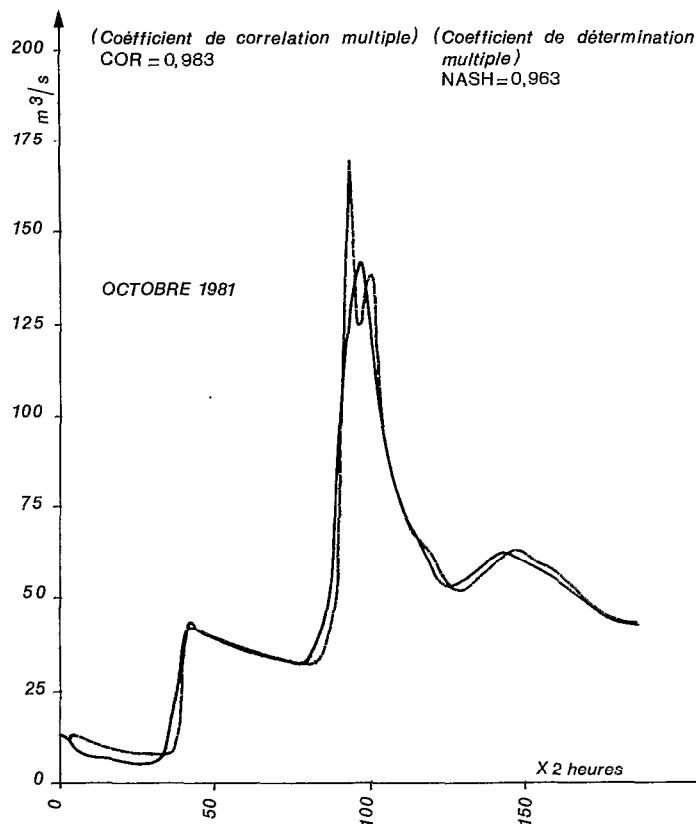


FIG.5. - Modèle adaptatif (filtre de Kalman)

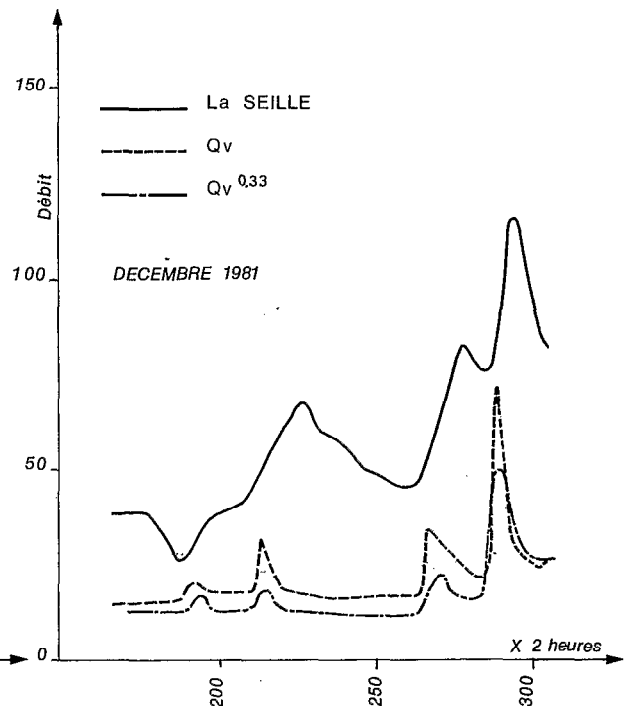


FIG.6. - Effet de transformation opérée sur le prévisseur brut QV

2.1. EFFET D'UNE TRANSFORMATION $[QV(L)]^a$

Le modèle de prévision à 6 heures se présenterait alors ainsi :

$$QM(+3) = x_1 QM(0) + x_2 QV(L)^a + x_3 \quad (1)$$

On a fait varier a de 0,5 à 0,2. Le tableau ci-dessous fait état de la variation de la corrélation partielle du prévisseur avec a . Les valeurs $a = 0,33$ et $L = 0$ ont été finalement retenues. La figure 6 représente l'effet de la transformation opérée sur le prévisseur brut QV .

a	Rp
1	0,782
0,45	0,790
0,33	0,803
0,25	0,793

Rp : coefficient de corrélation partielle de $QM(+3)$ avec $QV(0)$

2.1.1. Application des moindres carrés

Le modèle identifié par le filtre des moindres carrés est le suivant :

$$QM(+3) = 0,675 QM(0) + 2,82 [14,6 QV(0)^{0,33}] - 20,5$$

0,983
(0,027)
0,930
(0,21)
0,803
(12,2)

(c)
(b)
(a)

- (a) 0,930 : coefficient de corrélation partielle.
 (b) (0,027) : écart type du coefficient de régression (0,675).
 (c) 0,983 : coefficient de corrélation multiple.

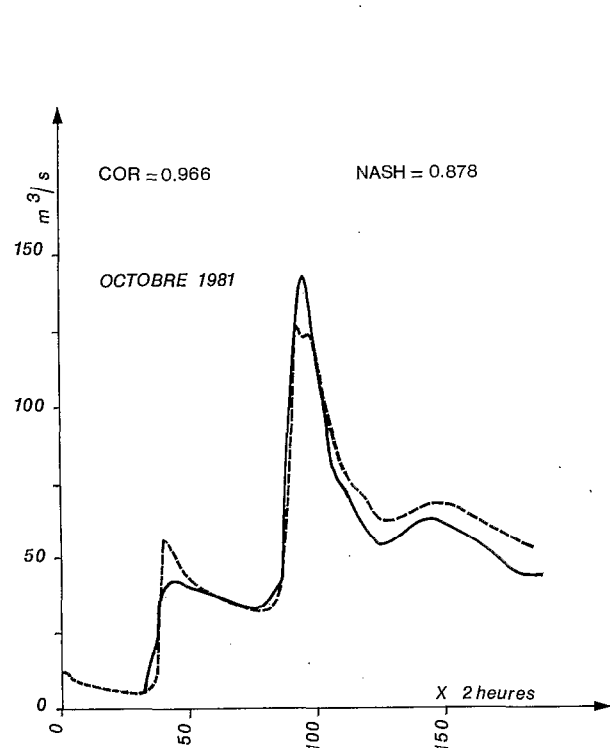


FIG.7. - Calage par les MC du modèle 1

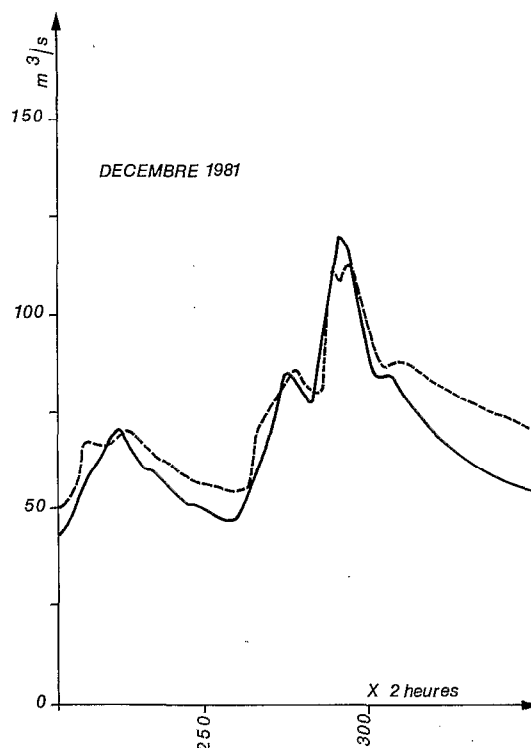


FIG.8. - Application du modèle 1 calé par les M.C.

Hormis le terme constant (20,5 m³/s), les coefficients sont tous très significatifs. L'identification a porté sur les 120 premières valeurs de la crue d'octobre. C'est la raison pour laquelle le modèle dérive en dehors de la période de « crue ». La figure 7 représente le résultat du calage et la figure 8 celui de la vérification (crue de décembre 1981).

La variance résiduelle (EQM²) pour ces deux crues est respectivement de 152,6 et de 68. Nous allons essayer de voir s'il est possible de la réduire en utilisant une procédure adaptative.

2.1.2. Application du filtre de Kalman (tabl. II)

2.1.2.1. En identification/prévision

Les paramètres du modèle (1) (avec $L = 0$ et $a = 0,33$ pour QV) sont identifiés à chaque étape de prévision, ou remis à jour, par une procédure adaptative consistant à déterminer un terme correctif (appelé gain : K) visant à minimiser l'erreur d'estimation des paramètres (trace de la matrice P) à partir de l'erreur de prévision.

On cale le filtre en intervenant sur les éléments diagonaux de la matrice [Q], matrice de variance – covariance de l'erreur [W] du système, et sur R, variance de l'erreur V sur l'équation de mesure (bruit sur la mesure).

Soit $E(W) = 0$; $E(W.W^T) = [Q]$; $E(V) = 0$; $E(V.V^T) = R$

Etant donné la non significativité du terme constant du modèle (1), nous avons convenu d'utiliser une formulation comportant seulement 2 paramètres X1 et X2 :

$$\begin{bmatrix} X1 \\ X2 \end{bmatrix}_{k/k-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X1 \\ X2 \end{bmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} W \end{bmatrix}_{k-1} \quad \text{équation d'état} \\ (X_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} X_{k-1} + W_{k-1})$$

$$\hat{Q}M_k = \begin{bmatrix} QM(0) & QV(0)^a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X1 \\ X2 \end{bmatrix}_k + V_k \quad \text{équation de mesure} \\ (Z_k = HX_k + V_K)$$

La structure d'erreur retenue (calage de [Q] et R) est celle qui minimise l'écart quadratique moyen ECM.

Avec l'application du filtre de Kalman formulée ci-dessus on obtient :

ECM² = 16. pour la crue du 16 octobre 1981.

ECM² = 10.7 pour la crue de décembre 1981.

2.1.2.2. En correction d'erreur

Lorsque l'on optimise les paramètres de correction de l'erreur de prévision du modèle ci-dessus par un filtre de Kalman, avec pour formule de correction d'erreur proposée la formule : $QM(+3) = X1 + X2 \text{ SPC}$ (où SPC est la prévision émise par le modèle (1) sans filtrage) la formulation du filtre devient alors :

$$\begin{bmatrix} X1 \\ X2 \end{bmatrix}_{k/k-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X1 \\ X2 \end{bmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} W \end{bmatrix}_{k-1} \quad \text{équation d'état}$$

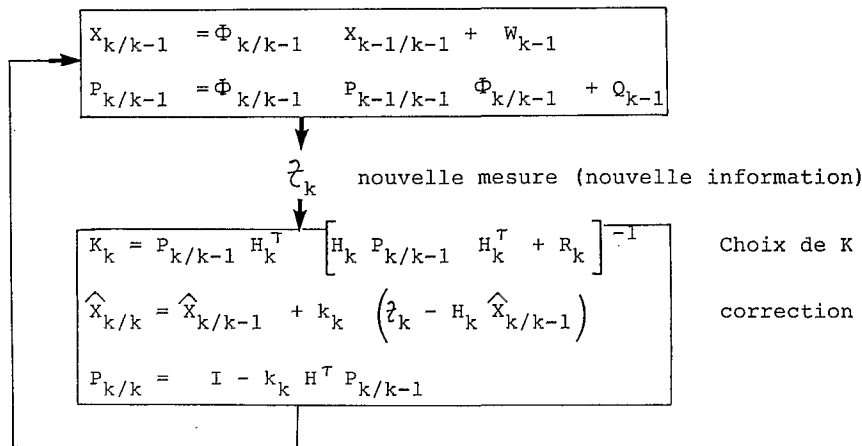
$$\hat{Q}M(3) = \begin{bmatrix} 1 \text{ SPC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X1 \\ X2 \end{bmatrix}_k + V_k \quad \text{équation de mesure}$$

avec

$$SPC = 0,675 \text{ QM}(0) + 2,82 (14,6 \text{ QV}^{0,33}) - 20,5$$

Le gain apporté par le filtre n'est pas très manifeste au niveau de la pointe de crue elle-même, quoiqu'il les améliore sensiblement dans les 2 cas (légère avance pour celle d'octobre et meilleure prévision pour la pointe de celle de décembre). Il a fallu pour cela faire en sorte de rendre le filtre assez « timide » (le modèle proposé étant satisfaisant en crue), ce qui se fait au détriment de la période où le filtre apporte une correction très significative par rapport à la régression brute (fig. 9 et 10). Le filtre de Kalman améliore donc la prévision relative à la période hors calage, ce qui est normal puisque le modèle a été identifié par les moindres carrés sur les 120 premières valeurs de la crue d'octobre.

TABLEAU II



H : Matrice de mesure

k : gain (vecteur de correction calculé de manière telle que Trace de P soit minimale)

P : matrice de variance-covariance d'erreur d'estimation du vecteur d'état X.

Φ : matrice de transition

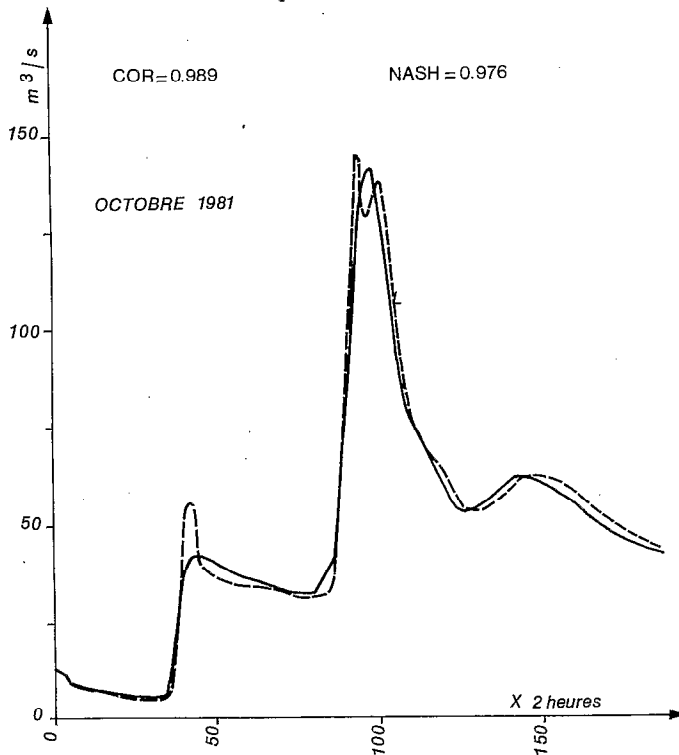


FIG.9. - Application d'un filtre de Kalman en correction d'erreur du modèle 1

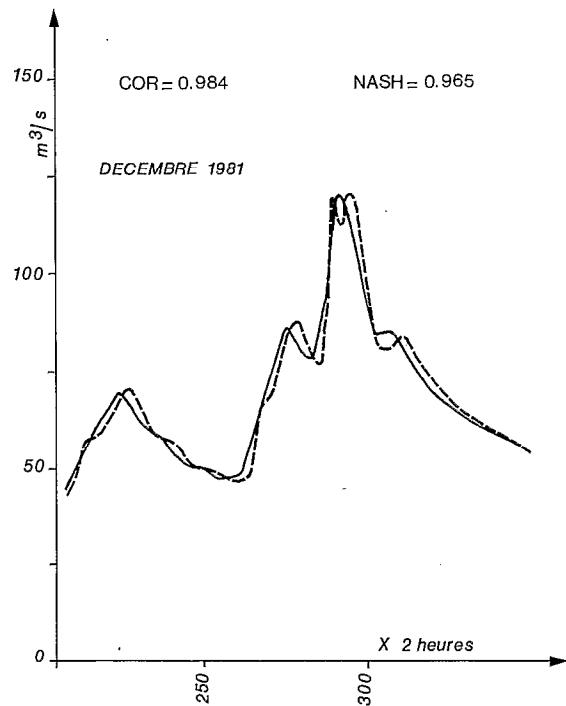


FIG.10. - Application d'un filtre de Kalman en correction d'erreur du modèle 1

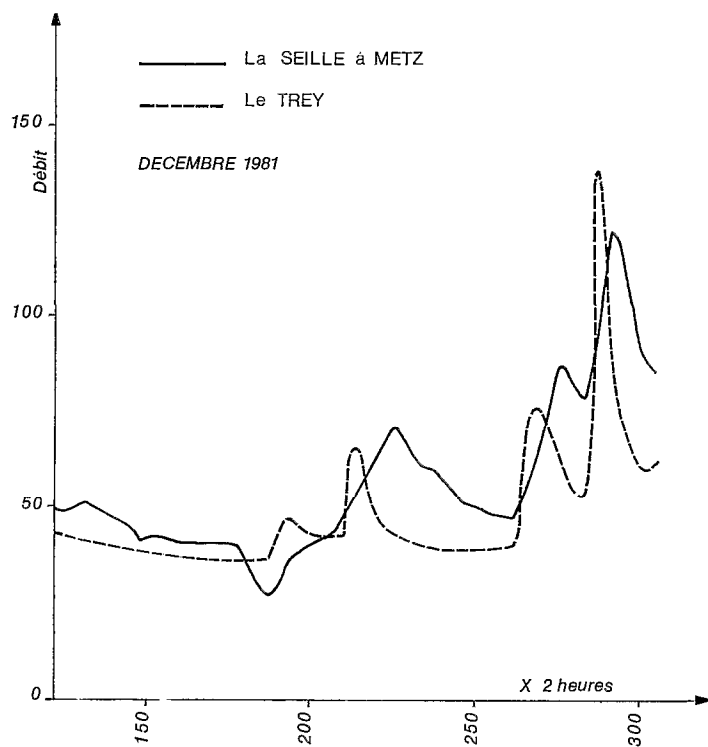


FIG.11

FIG.11. - Effet d'un réservoir non linéaire sur les débits du Trey

FIG.12. - Modèle (2) : calage

FIG.13. - Modèle (2) : sans filtrage

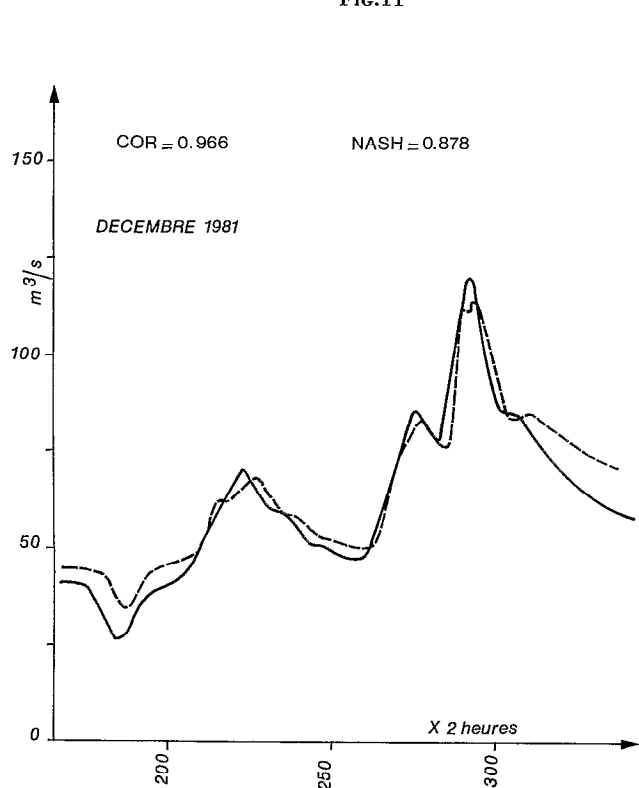


FIG.12

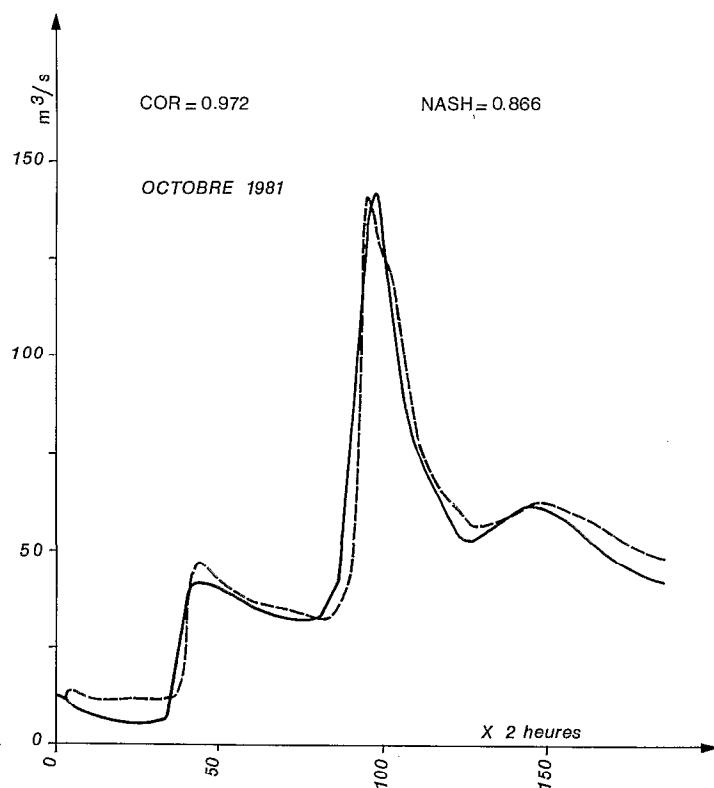


FIG.13

2.2. EFFET D'UN RÉSERVOIR NON LINÉAIRE SUR LES DÉBITS DU TREY A VANDIÈRES

La figure 11 compare l'effet d'un réservoir non linéaire de vidange $V = \frac{H^2}{H + x}$ pour une valeur de $x = 5$ au modèle $QV^{0,33}$; on initialise H à $H_0 = QV_0 \times 3.6 \cdot x^{2/38}$, et V devient alors $V \times 1\,286/7.2$ (H en mm).

(Le pas de temps est de deux heures et les superficies des bassins sont respectivement de 38 et 1 286 km²).

A noter que, dans le logiciel, il y a en fait deux réservoirs équivalents : l'un pour la phase correction, l'autre pour la phase prévision, lorsqu'on utilise une méthode adaptative.

Au regard de ces figures, on a de fortes raisons de penser que la contribution du signal émanant du bassin de Vandières peut être rendue également efficace grâce à l'interposition de ce réservoir non linéaire. On le vérifie immédiatement à partir du modèle calé par les moindres carrés qui donne lieu à des paramètres très significatifs avec des écarts-types quasiment égaux pour les deux variables :

$$QM (+3) = 0.73 QM (0) + 0.25 V + 5.5 \quad (2)$$

calage sur 50 points situés autour de la pointe

$$0.979 \quad (0.027) \quad 0.93 \quad (0.022) \quad 0.76 \quad (4.)$$

Le modèle (2) ci-dessus n'améliore significativement que la prévision de la crue d'octobre 81 (fig. 12) (échantillon de calage); celle de décembre étant sous-estimée (fig. 13).

Sur l'ensemble de la crue d'octobre 81 : $ECM^2 = 94$.

ECM^2 devient égal à 38 lorsqu'on utilise un filtre de Kalman en correction d'erreur, mais on note que l'amélioration porte essentiellement sur la décrue, pour les mêmes raisons évoquées précédemment. Dans ce cas, l'utilisation du filtre détériore même la qualité de la prévision de la pointe. La raison à cela est que le réservoir induit, au départ, un retard légèrement supérieur au modèle (1).

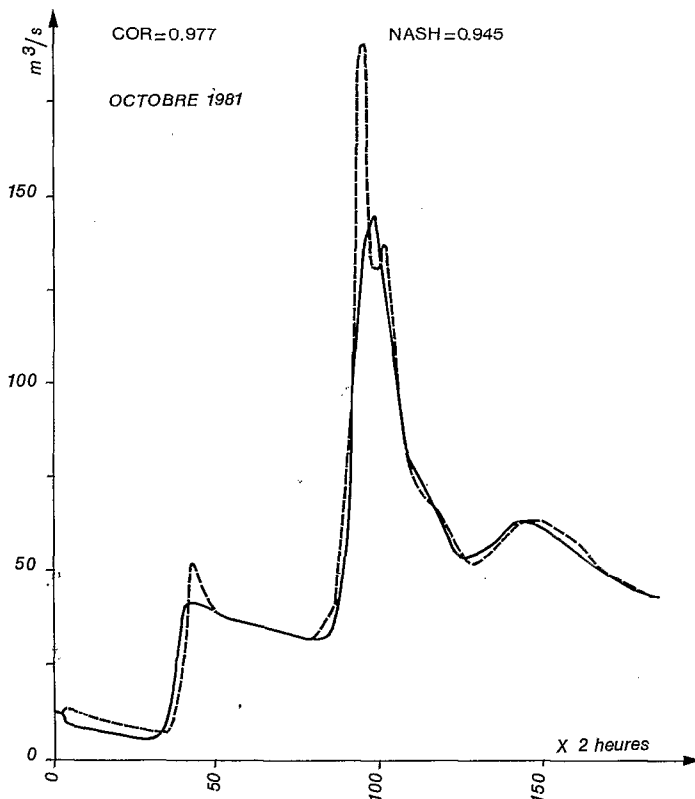


FIG.14. - Application du filtre de Kalman en correction d'erreur du modèle (2)

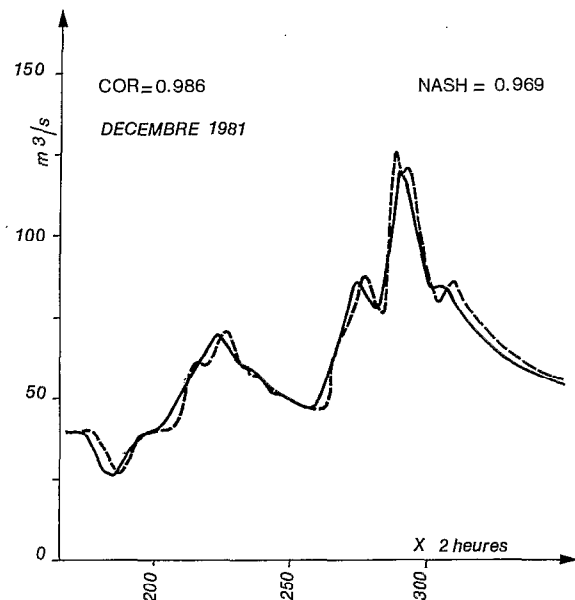


FIG.15. - Application du filtre de Kalman en correction d'erreur du modèle (2)

Cette crue d'octobre 1981 est en effet surestimée (fig. 14) par rapport à celle obtenue par le modèle (1). Elle présente le seul avantage d'être en avance, ce qui est néanmoins d'un certain intérêt. Concernant la crue de décembre 1981 (fig. 15) elle est, au niveau de la pointe, très correctement prévue avec même une avance sensible. Pour cette crue-là, ECM² et l'ensemble des autres critères sont sensiblement meilleurs qu'avec le modèle (1).

2.3. REMARQUES

(a) Concernant les deux modes d'utilisation du filtre de Kalman, soit en identification/prévision, soit en correction d'erreur de prévision émanant d'une régression brute, les résultats sont à peu de chose près équivalents à condition de prendre des conditions initiales (concernant P_0 : Matrice de variance - covariance d'erreur d'estimation de \hat{x}) proches de celles données par les filtres de moindres carrés préalablement appliqués à l'échantillon de calage.

(b) Prévision à 8 heures : les figures 16 et 17 représentent les résultats de la prévision à 8 heures (filtre de Kalman en identification/prévision) ; on constate une sensible dégradation de la qualité des résultats par rapport à la prévision à 6 heures.

(c) Un bassin joue déjà le rôle d'un filtre vis-à-vis du signal pluie, et sur l'exemple de la crue d'octobre on peut dès lors préjuger dans certains cas du caractère encore bien plus impulsif du cœur du signal d'entrée. Ce qui signifie que, notamment en mode adaptatif, il faille au préalable filtrer ce signal, en évitant toutefois que le type de filtrage adopté n'engendre trop de retard par rapport au signal initial. Le passage de la pluie brute à la pluie efficace est en quelque sorte un filtrage, puisqu'on élimine les bruits de fond (premières pluies faibles par exemple), mais sans pour cela amoindrir le caractère impulsif du signal pluie, comme est à même de le faire l'interposition d'un réservoir linéaire tel que celui utilisé ici. Concernant le cas de la Seille à Metz, il n'est pour l'instant pas envisageable de prévoir au delà de 8 heures, sans le recours aux pluies au pas de temps bi-horaire.

(d) Dans un travail ultérieur, non résumé ici, il a été démontré le gain apporté par les pluies bi-horaires pour un délai de 8 heures (gain négligeable pour 6 heures par rapport aux modèles (1) et (2)) mais elles n'ont pas permis une prévision de qualité suffisante pour 12 heures.

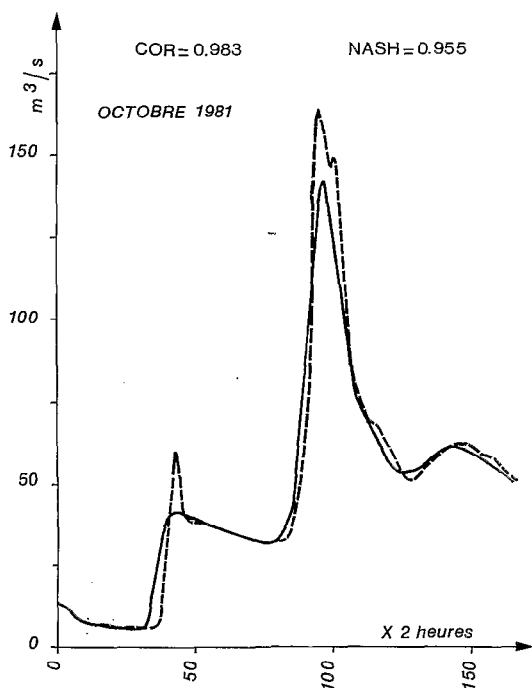


FIG.16. - Prévision à 8 heures (octobre 1981)

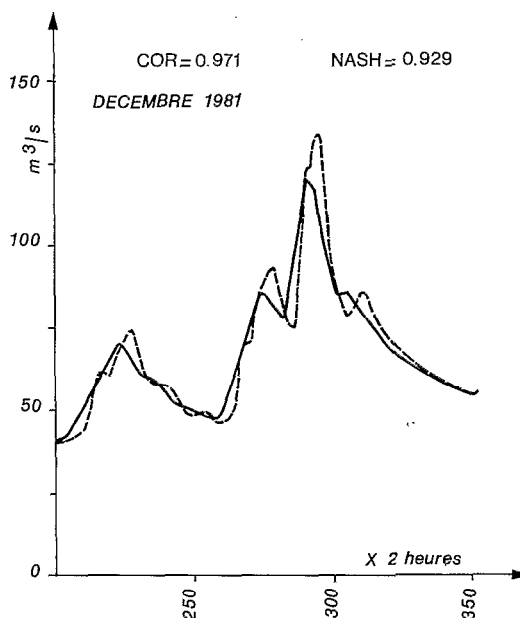


FIG.17. - Prévision à 8 heures (décembre 1981)

3. CONCLUSION

On a pu montrer que, par un traitement approprié de la réponse d'un bassin voisin, dans le cas présent de caractéristiques physiques différentes, il était possible d'améliorer significativement la qualité des prévisions des débits de la Seille à Metz. Le filtre utilisé en correction d'erreur de prévision (ou en identification) était sensible aux deux transformations adoptées sur cette variable extérieure. Ce travail dispose de trop peu d'informations pour affirmer de manière catégorique lequel des deux traitements était le mieux adapté. Il semblerait, au vu des résultats émanant des régressions brutes sur la crue de calage d'octobre, que celle-ci est mieux prévue avec la transformation, par un réservoir non linéaire, plutôt qu'avec une transformation en QV^a . Cet effet est surtout manifeste pour la crue de calage, où le décalage entre le démarrage de la crue du Trey et celui de la Seille est bien plus faible que pour la crue de contrôle.

A défaut de pouvoir réunir des justifications plus abondantes, il a été proposé au Maître d'ouvrage d'utiliser la transformation en QV^a , en mode adaptatif, pour la prévision à 6 ou 8 heures des débits de la Seille à Metz.

REMERCIEMENTS

Ce travail a reçu une participation financière de la Délégation du Bassin Rhin-Meuse.

Manuscrit accepté par le comité de Rédaction le 1.10.1986.